علوم کاربردی سیب‌زمینی
سال هفتم شماره ۲ ، پائیز و زمستان ۱۴۰۳

روش های نوین بهبود توزیع جریان هوا در انبارهای فنی سیب‌زمینی

فرزاد گودرزی [1*]

۱- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران

** نشانی پست الکترونیکی نویسنده مسئول:* goodarzifarzad@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۹ تاریخ انجام اصلاحات: ۱۴۰۴/۰۳/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

چکیده

نگهداری بهینه سیب‌زمینی در انبار نیازمند کنترل رطوبت سطحی و توزیع یکنواخت جریان هواست. شیوه مرسوم تهویه هوای انبار معمولاً قادر به دفع کامل گرما و رطوبت اضافی توده انبارشده نیست. توزیع نامتوازن هوا باعث تفاوت دمایی، چگالش رطوبت، رشد قارچ، فساد میکروبی و افزایش آفات می‌شود. سامانه‌های تهویه تحت فشار اگرچه جریان هوای یکنواختی را ایجاد می‌کنند اما در عمل، هوا از مسیرهای کم‌مقاومت (مانند فضای بین پالت‌ها) عبور کرده و به داخل توده محصول نفوذ نمی‌کند. در انبارهای فنی جدید برای حل مشکل عدم یکنواختی جریان هوا، یکی از دو شیوه زیر به‌کار گرفته میشود: روش نخست، تعبیه دیواره شکاف‌دار در انبار است که در آن با استفاده از یک محفظه تنظیم و یکنواخت کردن فشار هوا (محفظه پلنیوم) و دیواره‌ای با شکاف‌های هم‌تراز با پالت‌ها یا سطح گونیهای چیده‌شده، هوا به‌صورت یکنواخت توزیع می‌شود. این سامانه برای انبارهای با عمق ۱۲–۱۵ متر و خشک‌کردن اولیه محصول مناسب است. روش دوم، استفاده از دیواره مکش است. در این شیوه هوا از انتهای پالت‌ها یا ردیف‌های گونیها مکیده می‌شود و با ایجاد یک فشار منفی، جریان یکنواخت هوا از داخل محصول انبارشده به سمت سامانه تهویه برقرار میشود. این شیوه در انبارهای عمیق‌تر (بیش از ۱۲ متر) حتی در حالت نیمه‌پر نیز یکنواختی جریان هوا را به‌خوبی ایجاد می‌کند. در برخی انبارها از ترکیب دو سامانه اشاره‌شده استفاده میشود و با ایجاد مقاومت جزئی در مسیر عبور جریان هوا، توزیع جریان هوا بهتر و یکنواخت‌تر می‌شود. به‌کارگیری این دیوارهها، کاهش ۳۰ درصدی پلاسیدگی غده‌های سیب‌زمینی، کاهش ۲۰ درصدی مصرف انرژی سامانه تهویه و افزایش ماندگاری ۴ هفته‌ای محصول انبارشده را نسبت به انبارهای فنی فاقد این دیواره‌ها به همراه دارد. هزینه ساخت و نصب این دیواره‌ها کم‌تر از ۰/۵۱ درصد هزینه کل تأسیس انبار است و روشی مقرون به‌صرفه محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: *تهویه، دیواره شکاف‌دار، دیواره مکش، یکنواختی جریان هوا*

بیان مسئله

انبارداری بلندمدت سیب‌زمینی در شرایط بهینه، به دو عامل کلیدی وابسته است: نخست عاری بودن غده‌های سیب‌زمینی از رطوبت سطحی مازاد و دوم یکنواخت بودن جریان گردش هوا در سراسر فضای انبار. دبی لازم برای تهویه هوا در انبارهای فنی متداول سیب‌زمینی، ۰/۰۳ مترمکعب بر ثانیه به ازای هر تن محصول در نظر گرفته می‌شود اما این میزان جریان هوا، عمدتاً برای توزیع یکنواخت و متوازن هوا در انبار است و نه برای دفع گرمای انتقالی و رطوبت مازاد (۱).

توزیع نامتوازن جریان هوا در فضای انبار نگهداری سیب‌زمینی باعث ناهمگونی تهویه در بخش‌های مختلف انبار و در نهایت ایجاد اختلاف دما در نقاط مختلف انبار خواهد شد. تفاوت‌های دمایی ایجادشده، خطر چگالش (میعان) رطوبت روی سطوح در نقاط خنک‌تر انبار را افزایش می‌دهد که در نهایت به رشد پوسیدگی قارچی، فساد میکروبی محصول و افت کیفیت نهایی توده انبارشده منجر می‌شود. علاوه بر آن، خطر گسترش فعالیت آفات و بیماری‌های انباری در بخشهایی از انبار که هوا در آن‌جا راکد است، بالاتر است. بنابراین وجود سامانه‌های بهبوددهنده کارایی تهویه در انبارهای سیب‌زمینی ضروری است. ادوات تهویه با فشار مثبت (شامل دمنده‌ها، کانال‌های تهویه و سامانه‌های خنک‌کننده) از جمله کارآمدترین سامانه‌های تهویه برای رسیدن به چنین هدفی هستند که در آن، هوا با فشار کافی (حدود ۰/۰۸ مترمکعب در ثانیه به ازای هر تن محصول انبارشده) به‌طور یکنواخت از لابلای توده سیب‌زمینی انبارشده عبور داده می‌شود. با این حال در بیش‌تر مواقع، جریان هوا برای گردش در فضای انبار (خواه توده انبارشده فله باشد و خواه بسته‌بندی‌شده درون جعبه، پالت و یا گونی) به‌صورت غیرفعال در اطراف جعبه‌ها گردش می‌کند و به جای حرکت از لابلای غده‌های سیب‌زمینی از مسیری با کم‌ترین مقاومت (مسیر میانبر مانند: فضای خالی بالای توده سیب‌زمینی انبارشده) حرکت می‌کند. تهویه هوا در چنین حالتی، کارایی پائینی دارد و نمی‌تواند اهداف مورد نظر از اجرای تهویه هوا (خنک کردن و رساندن هوای تازه به محصول) را به‌خوبی برآورده کند (۱، ۳ و ۶). بنابراین لازم است که تمهیداتی به‌کار گرفته شود تا جریان هوا به‌صورت اجباری به درون توده محصول انبارشده هدایت شود تا هوای موجود در لابلای غده‌ها به شکل مناسبی با هوای تازه جایگزین شود. یکی از راه‌های کارآمد برای بهبود یکنواختی و هدایت مؤثر جریان هوا در انبارهای فنی سیب‌زمینی، استفاده از سامانه‌های دیواره مکش (Suction Wall) یا دیواره شکاف‌دار (Letter Box Wall) است تا احتمال حرکت هوا از مسیرهای میانبر (short-circuiting) و کم‌اثر کاهش یابد. دیوارههای مکش یا شکاف‌دار، کارآمدی و یکنواختی توزیع جریان هوا در انبارهای فنی سیب زمینی را بهبود می‌بخشند؛ با این حال تفاوت‌هایی در کارکرد، مزایا و ویژگی‌های این دو سامانه وجود دارد. انتخاب بین دیواره‌های شکاف‌دار (موسوم به دیواره‌های صندوق پستی) و دیوار مکش به نیازهای خاص انبار سیب‌زمینی از جمله: عمق انبار، نوع محصولات انبارشده، نحوه قرارگیری ادوات تهویه و سطح مطلوب مورد انتظار برای کنترل جریان هوای درون انبار بستگی دارد (۴، ۷ و ۸).

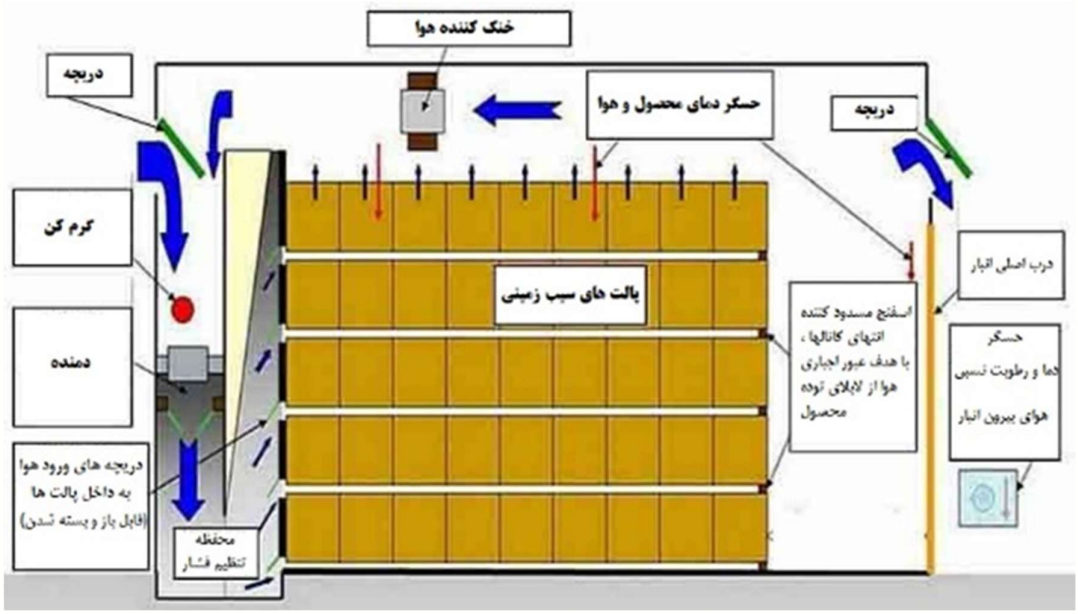
معرفی دستاورد

ویژگی‌ها، مزایا و شرایط ویژه به کارگیری سامانه‌های دیواره مکش (Suction Wall) یا دیواره شکاف‌دار (Letter Box Wall) در انبارهای فنی سیب زمینی به شرح زیر است:

دیواره شکاف دار

اثر دیواره‌های شکاف دار رایج‌ترین ساختار توزیع جریان هوا برای تلفیق با سامانه تهویه مثبت در انبارهای سیب‌زمینی هستند. این سامانه از تهویه با فشار مثبت (هوای ورودی اجباری) استفاده می‌کند و معمولاً برای انبارهایی با بیشینه عمق ۱۲ تا ۱۵ متر کارایی دارد. این دیواره از نظر مدیریت چگونگی توزیع جریان هوا در ردیف‌ها، از انعطاف‌پذیری خوبی برخوردار است. سامانه‌های دیواره شکاف‌دار با ساخت یک محفظه یکنواخت‌کننده جریان (پلنوم) در پشت جعبه‌ها/گونی‌های سیب‌زمینی که دیواره سمت محصول آن با تخته سه لای شکاف‌دار ساخته شده است، راه‌اندازی می‌شود. شکاف‌ها در تراز با فضای خالی بین هر دو پالت روی هم و یا ردیف‌های گونی‌های سیب‌زمینی تعبیه می‌شوند. هوای متراکم در محفظه پلنوم از طریق شکاف‌های باز روی دیواره به لابلای پالت‌ها منتقل می‌شود تا هوا از طریق فضای لابلای توده انبارشده در پالت یا گونی در انبار گردش کند (شکل‌های ۱ و

۲). این سامانه برای خشک کردن سطح خیس سیب‌زمینی‌های تازه برداشت‌شده در ابتدای دوره انبارداری بسیار مناسب است (۲، ۶ و ۷).



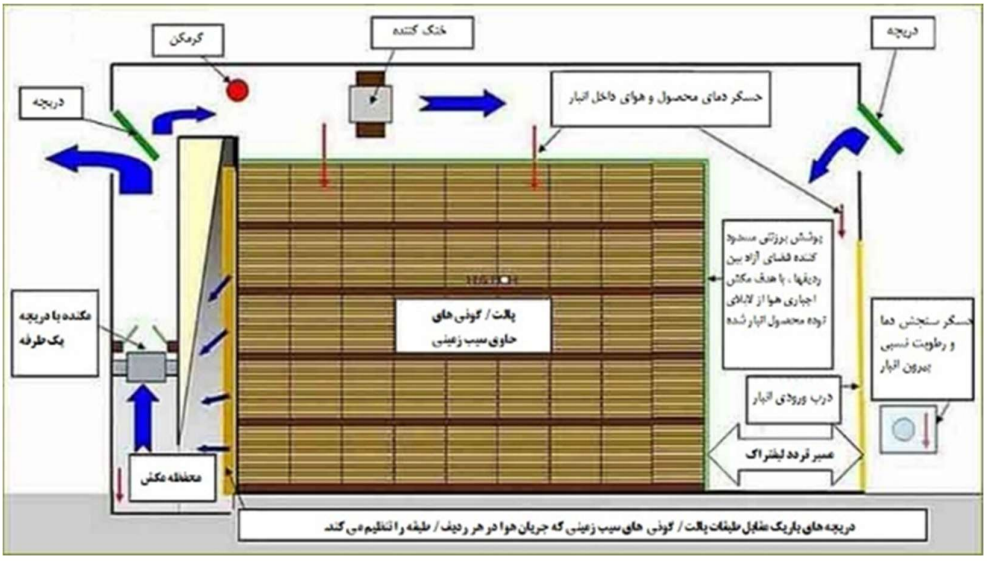
شکل ۱- ساختار، اجزاء و نحوه عملکرد دیواره شکافدار در انبار سرد سیب‌زمینی (به جهت جریان هوا در انبار و لابلای پالت‌ها توجه شود)

شکل ۲- نحوه استقرار دیواره شکافدار و پالت‌های سیب‌زمینی در یک انبار سرد

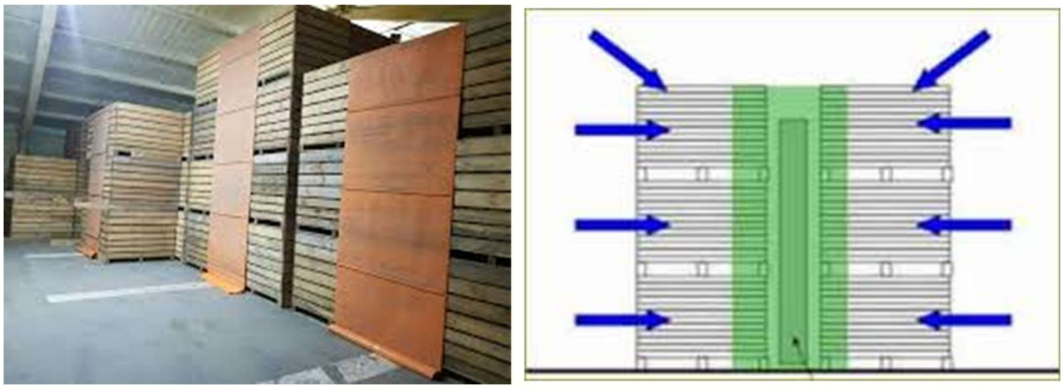
دیواره مکش

استقرار سامانه دیوار مکش در انبار سبب زمینی باعث می‌شود هوا به شکل فعال از انتهای جعبه‌ها/گونی‌ها/پالت‌های حاوی سیب‌زمینی به سمت دمنده ها مکیده شود (شکل ۳). این یک روش سازگارتر و کم‌هزینه‌تر است و برای انبارهای با عمق بیش‌تر از ۱۲ متر، امکان توزیع بهتر هوا را فراهم می‌کند (۵ و ۹). این شیوه حتی در انبارهای نیمه‌پر نیز کارایی خوبی دارد.

دیواره مکش درست در زیر یا پشت سامانه تهویه موجود در انبار استقرار می‌یابد زیرا از ایجاد یک ناحیه با فشار منفی (فشار مکشی) برای یکنواخت کردن جریان هوا در انبار و ایجاد یکنواختی در خشک کردن و خنک کردن توده انبارشده استفاده می‌کند. در این سامانه، فواصل و فضاهای خالی بین ردیف‌های چیده‌شده در انبار به‌وسیله پارچه‌های ضخیم پوشیده می‌شود تا هوا وادار به حرکت از لابلای توده محصول شود (شکل ۴).



شکل ۳- ساختار، اجزاء و نحوه عملکرد دیواره مکش در انبار سرد سیب‌زمینی (به جهت جریان هوا در انبار و لابلای پالت‌ها توجه شود)



شکل ۴- نحوه استقرار و عملکرد پوشش برزنتی مسدودکننده فضای بین ردیف‌های جعبه/گونی/پالت‌های سیب‌زمینی در سامانه دیواره مکش انبار سیب‌زمینی

دیواره مکش ترکیب‌شده با دیواره شکاف‌دار

این سامانه با استفاده از یک محفظه مکش مهندسی‌شده در طول دیوار انتهایی انبار، یکنواختی خوبی را در گردش هوا ایجاد می‌کند. این محفظه دارای شیارهای دقیق برش‌خورده‌ای است که با شیارهای پالت یا جعبه‌ها و یا ردیف‌های گونی‌های سیب‌زمینی هم‌تراز هستند اما چون کمی کوچک‌تر از دهانه استاندارد پالت یا فاصله بین ردیف‌های گونی‌های سیب‌زمینی هستند، مقاومت جزئی در برابر جریان هوا ایجاد می‌کنند (۷ و ۹). این ویژگی به توزیع یکنواخت‌تر هوای بازگشتی به دمنده‌ها کمک می‌کند (شکل ۵)..

تحلیل الگوی جریان هوا

بررسی الگوی جریان هوا در انبارهایی که این دیواره‌ها در آن‌ها نصب شده است، نشان‌دهنده توزیع یکنواخت هوا در امتداد شیارهای پالت یا فواصل ردیف‌های چینش گونیهای سیب‌زمینی است (شکل ۶). اگرچه مقداری افت هوا در لبه بالایی و تراکم کمی بیش‌تر در نزدیکی دمنده‌های مرکزی انبار مشاهده می‌شود اما در کل، یکنواختی توزیع هوا در انبار مطلوب است. به‌ویژه آن‌که جریان هوا در بخش‌های میانی محموله که خطر تهویه ناقص در آن نقاط بیش‌تر از سایر نقاط انبار است، از سرعت کافی (و حتی بیش‌تر از بخش‌های حاشیه‌ای) برخوردار است. برای انبارهایی که تهویه آن به شکل طبیعی (با کمک وزش باد غالب منطقه و بدون کمک گرفتن از سامانه تهویه و دمنده) انجام می‌شود، وجود دیواره مکش و یا دیواره شکاف‌دار سبب یکنواختی مطلوب جریان هوا می‌شود. چنین توزیع هوای متعادلی، بهترین عملکرد را در تهویه هوای انبار ایجاد می‌کند و برای ارتقاء سامانه گردش هوای انبار، انتخاب بسیار مناسبی است (۳ و ۱۰).

شکل ۵- دیواره مکش ترکیب‌شده با دیواره شکاف‌دار که در زیر سامانه دمنده انبار تعبیه شده است

شکل ۶- سرعت جریان هوا (متر بر ثانیه) در نقاط مختلف یک انبار سیب‌زمینی دارای دیواره شکاف‌دار که در عمق و ارتفاع انبار به‌ترتیب ۹ و ۷ ردیف پالت نگهدارنده محصول، چیده شده است.

توصیه ترویجی

استفاده از دیواره مکش و یا شکاف‌دار در مقایسه با سامانه‌های متعارف هوادهی در انبارهای فنی سیب‌زمینی، بهبود قابل‌توجهی در یکنواختی توزیع جریان هوا در تمام فضای انبار ایجاد می‌کند که حاصل آن، بهبود قابل‌توجه در کیفیت نگهداری سیب‌زمینی است. علاوه بر کاهش زمان خشک کردن رطوبت مازاد محصول تازه برداشت‌شده، این سامانه به یکنواختی دما و رطوبت نسبی سراسر انبار نیز کمک می‌کند که در نهایت منجر به کاهش زمان کارکرد دمنده‌ها و سامانه خنک‌کننده، کاهش پلاسیدگی غده‌های سیب‌زمینی درون انبار و کاهش خطر میعان و جوانه‌زدن غده‌ها می‌شود. هم‌چنین تخلیه دی اکسید کربن و حرارت ناشی از تنفس غده‌ها و رساندن اکسیژن کافی به محصول، از مزایای دیگر این دیواره‌ها است (۱، ۶ و ۹).

براساس برآوردها، هزینه‌ای که برای ساخت و نصب محفظه مکش انجام می‌شود در مقایسه با مزایای حاصل از اجرای آن، کاملاً مقرون به صرفه است. هزینه ساخت و نصب این محفظه کم‌تر از ۰/۵۱ درصد از هزینه کل پروژه یک انبار فنی سیب‌زمینی است و ملاحظه می‌شود که سهم بزرگی از هزینه کلی تأسیس یک انبار فنی سیب‌زمینی را شامل نمی‌شود. این در حالی است که وجود این دیواره می‌تواند میزان پلاسیدگی یا افت کیفیت سیب‌زمینی انبارشده ناشی از عدم یکنواختی دما و رطوبت نسبی هوای انبار و یا خیس شدن سطحی غده‌ها در اثر چگالش را تا ۳۰ درصد کاهش داده و عمر انبارداری سیب‌زمینی را تا ۴ هفته افزایش دهد. در کنار این مزایا، کاهش ۲۰ درصدی مصرف انرژی سامانه تهویه و هم‌چنین نیاز به استفاده از تعداد کم‌تر کارگر در طول دوره انبارمانی از مزایای دیگر به‌کارگیری این دیواره‌ها در انبارهای فنی سیب‌زمینی است (۲، ۶ و ۸).

طراحی و نصب اصولی این دیواره‌ها در انبار فنی سیب‌زمینی، عملیاتی تخصصی است. برای به‌کارگیری صحیح این دیواره‌ها از متخصصان ساخت و نصب سامانه‌های تهویه کمک بگیرید

.

فهرست منابع

1- Chourasia, M. K. and Goswami, T. K. 2007. CFD simulation of effects of operating parameters and product on heat transfer and moisture loss in the stack of bagged potatoes. Journal of Food Engineering, 80 (3): 947-960. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.07.015.

2- Cunnington, A. 2023. Developments in automated potato storage management. European Potato Journal, 66 (4):1305-1314. DOI:10.1007/s11540-023-09631-x.

3- Eltawil, M. A. Samuel, D. V. K. and Singhal, O. P. 2006. Potato storage technology and store design aspects. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Invited Overview No. 11. Vol. VIII.

4- Mooij Agro. Air distribution. MooijAgro Solutions for Potatoes. from https://www.mooij-agro.com/en/solutions-for-potatoes/air-distribution/. Last Access 8/5/2025.

5- Pringle, B., Bishop, C. F. H. and Clayton, R. C. 2009. Store ventilation, in: Potatoes postharvest. pp: 164-217. CABI publication. https://doi.org/10.1079/9780851995021.0164. Last Access 8/5/2025.

6- Sáenz-Baños, B., Ugalde, J. M., Cáceres, R. and Moreira, M. T. 2022. Methodology for energy demand reduction of potato cold storage process. Journal of Food Process Engineering, 45(4), e14127: 1-13. https://doi.org/10.1111/jfpe.14127

7- Scottish Agronomy. Letter box or suction wall for potato storage. Scottish Agronomy LTD. from https://scottishagronomy.co.uk/letter-box-or-suction-wall-for-potato-storage. Last Access 8/5/2025.

8- Teagasc. (n.d.). Potatoes - Storage. Teagasc - Agriculture and Food Development Authority. from https://teagasc.ie/crops/crops/potatoes/potatoes-agronomy/storage/. Last Access 8/5/2025.

9- VDT Agri Projects. Reverse drying wall for potatoes. VDT Agri Projects. from https://www.vdt-nl.com/en/reverse-drying-wall-for-potatoes. Last Access 8/5/2025.

10- Zhen, Q., Xu, C., Wang, H., Yue, X., Yan, C. and Sun. Y. 2025. Research on the temperature and humidity distribution characteristics in potato storage facilities: Experimental analysis and numerical simulation. Frontiers in Sustainable Food Systems, 9, 1594791:1-22. doi: 10.3389/fsufs.2025.1594791..